

Sensores para la caracterización del suelo agrícola usados en agricultura de precisión

Pilar Barreiro.

Profesora titular. Departamento de Ingeniería Rural, ETSI Agrónomos.

En este artículo se resumen los detalles técnicos más relevantes relativos al presente comercial de los sensores para la caracterización agronómica del suelo y sus perspectivas futuras y se hace referencia detallada a varios artículos científicos de revisión reciente con más de doscientos trabajos analizados sobre este particular.

La variabilidad espacial que se observa en los cultivos es el resultado de la interacción compleja entre factores edáficos (salinidad, materia orgánica, textura, estructura y nutrientes), antropogénicos (compactación del suelo debido al tráfico de maquinaria agrícola, riego y drenaje, lixiviación de solutos aplicados por el hombre), biológicos (plagas, enfermedades), topográficos (pendiente y altitud) y climáticos (temperatura, humedad relativa y precipitaciones). Según datos del Instituto Mundial de Recursos (World Resources Institute), a principios de los años noventa del siglo XX el manejo inapropiado de los suelos agrícolas había derivado ya en la aparición de síntomas de degradación en el 38% de los 1.500 millones de hectáreas cultivables a nivel mundial. En este contexto el manejo sostenible del trío suelo-planta-agua resulta fundamental.

Existen dos aproximaciones fundamentales de la agricultura de precisión al estudio masivo de la variabilidad del suelo: la detección remota (imágenes de satélites o con vuelos tripulados) y el registro a nivel del terreno (muestreo combinado con análisis de laboratorio o empleo de sensores a bordo de equipos móviles). Mientras que la detección remota está especialmente indicada para el seguimiento de propiedades espaciales dinámicas, tales como la evolución vegetativa de grandes extensiones de cultivo, la caracterización sobre el terreno se adapta mejor al registro de propiedades espacialmente más estáticas, como la textura, el nivel freático y la salinidad, empleando para ello una mayor resolución espacial.

En la última década del siglo XX han proliferado distintos sensores eléctricos y electromagnéticos, ópticos, mecánicos, electro-químicos, acústicos y neumáticos, que pueden ser incorporados a vehículos móviles para la caracterización del suelo. La mayoría de ellos tiene como característica común su sensibilidad a más de un factor agronómico del suelo (**cuadro I**); los dos últimos se encuentran aún lejos de una fase comercial y no serán considerados en este artículo.

Del **cuadro I** se deduce que los sensores eléctricos y electromagnéticos, junto con los ópticos, son los más inespecíficos (textura, materia orgánica, contenido en agua, nitratos, capacidad de intercambio catiónico), mientras que los mecánicos son muy específicos de las propiedades estructurales del suelo (densidad aparente y presencia de suelo de labor). Los sensores electro-químicos permiten detectar independientemente parámetros como la salinidad, el pH y la composición en una variedad de iones (potasio, nitratos, magnesio). Dos sensores son tanto más complementarios cuanto más distintos son los parámetros que determinan, y tanto más redundantes cuanto más coinciden en las características registradas. El reto, por tanto, es seleccionar la combinación de tecnologías con una mayor potencialidad, aspecto que discutiremos al término de la presentación de los distintos sensores.

Sensores eléctricos y electromagnéticos

El parámetro eléctrico a determinar es la conductividad eléctrica aparente (ECA en inglés, mSm^{-1}) que es un promedio de la circulación eléctrica por tres vías distintas (**figura 1**):

1. La fase líquida del suelo que tiene nutrientes disueltos.
2. La fase sólido-líquida debida al intercambio de cationes asociado con arcillas y minerales.
3. La fase sólida derivada del contacto físico entre partículas sólidas.

Una explicación detalla de la contribución de cada uno de estos factores a la ECA puede encontrarse en Corwin y Lesch (2005). No debe confundirse la ECA con la ECE (dSm^{-1}), que refiere la conductividad eléctrica determinada en el extracto saturado del suelo.

Existen tres grandes casas comerciales que comercializan equipos para la determinación de las propiedades eléctricas del suelo: Veris (3100), Geocarta (ARP), y Geonics (EM31 y EM38). Las dos primeras emplean métodos resistivos (ER) sobre la base de una medida directa (DC) de la conductividad eléctrica y precisan la introducción en el suelo

Cuadro I.

Sensores disponibles para el análisis dinámico de suelos y atributos evaluados con cada uno de ellos (Adamchuk y cols. 2004).

	Temperatura	Materia orgánica	Humedad	Salinidad	Compactación	Suelo de labor	pH	N	K	CNC
Eléctricos y EM	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓
Ópticos	✓	✓	✓				✓	✓		
Mecánicos					✓	✓				
Electroquímicos				✓		✓	✓	✓		

En el estudio de caracterización de los suelos la detección remota está especialmente indicada para el seguimiento de propiedades espaciales dinámicas, tales como la evolución vegetativa de grandes extensiones de cultivo y la caracterización sobre el terreno se adapta mejor al registro de propiedades espacialmente más estáticas, como la textura, el nivel freático y la salinidad, empleando para ello una mayor resolución espacial.

de electrodos tanto de corriente como de voltaje. En estos equipos, se denomina "configuración Werner" a aquélla que emplea cuatro electrodos alineados y equiespaciados (figura 2), en la que los electrodos externos realizan la función de transmisión de corriente mientras que los internos efectúan la determinación del potencial. En este caso, la profundidad de penetración de la corriente y el volumen de suelo evaluado aumentan proporcionalmente con la distancia entre electrodos (a); y en el caso de un suelo homogéneo, el volumen evaluado es aproximadamente πa^2 .

Los métodos ERDC son invasivos (figura 3), dado que implican la introducción de electrodos en el suelo, y ofrecen determinaciones menos fiables que los procedimientos electromagnéticos en suelos muy secos o pedregosos. La principal ventaja de esta tecnología es que la profundidad y el volumen de suelo evaluado pueden modificarse de forma sencilla sin más que alterar la distancia entre electrodos. Además, dado que la medida de ECa es lineal en toda la profundidad evaluada, es posible derivar la EC correspondiente a un determinado rango de profundidad sin más que realizar pasadas sucesivas con una distancia creciente entre electrodos.

Los equipos comerciales basados en inducción electromagnética (EM) emplean corriente alterna que, al circular por una bobina emisora, generan un campo magnético en el suelo, que a su vez genera una corriente eléctrica en una bobina receptora. La señal es posteriormente amplificada y acondicionada en voltaje y es proporcional al volumen de suelo evaluado y a la ECa del mismo. Es posible conseguir profundidades variables con un equipo EM modificando la posición de la bobina de horizontal (EM_h) a vertical (EM_v), siendo mayor cuando la bobina se encuentra en posición horizontal que vertical (0,75 m y 1,5 m para Geonics EM-38v y EM-38h, respectivamente). Existe otro modelo, Geonics EM-31, de menor uso en agricultura dado que alcanza una profundidad de 6 m. La diferencia entre ambos reside en la distancia entre bobinas, que está positivamente correlacionada con la profundización de la señal en el suelo.

Recientemente, Geonics ha introducido en el mercado un equipo dual (EM-38 dual-dipole) (foto 1) que dispone de una bobina horizontal y otra vertical que van alternando sus medidas cada varios segundos. Según Corwin y Lesch (2005), la relación de conductividades aparentes obtenidas con EM_h y EM_v refleja las propiedades de conductividad hidráulica del suelo y permite evaluar la lixiviación de nutrientes. Según estos mismos autores, la media geométrica en EM_h y EM_v está relacionada con las propiedades químicas de la fracción acuosa del suelo.

La medida de ECa revela la heterogeneidad del suelo debida a variaciones de textura, salinidad, materia orgánica, contenido en agua y profundidad de la capa de erosión de arcilla. La ECa está positivamente relacionada con el contenido en arcilla, la densidad aparente del sue-

Figura 1.

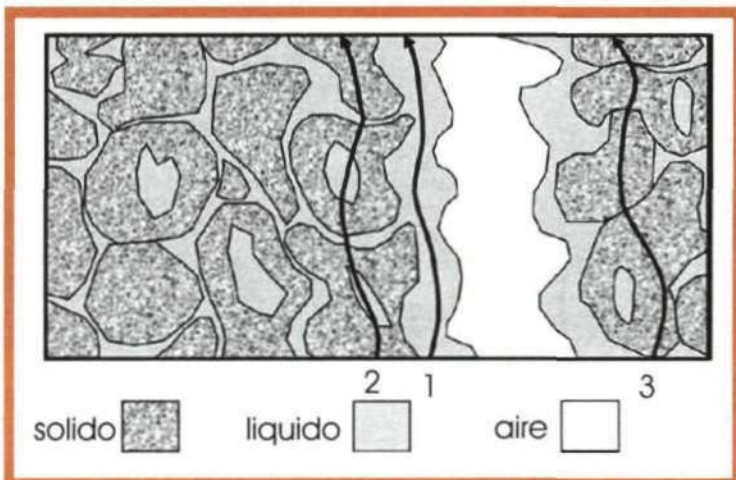


Figura 2.

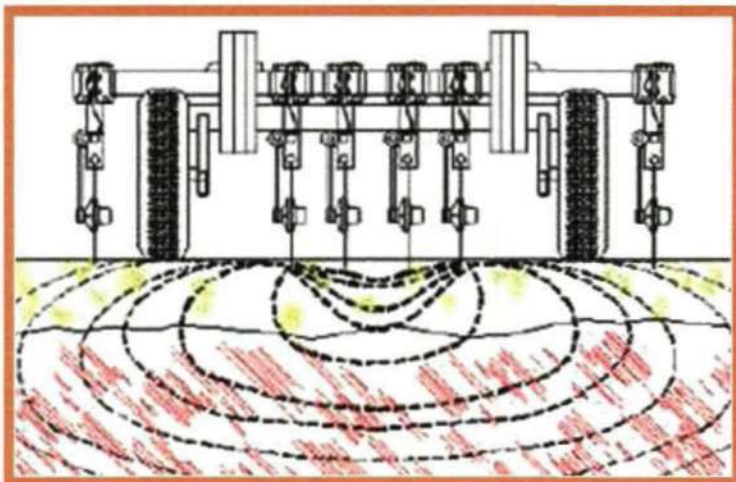
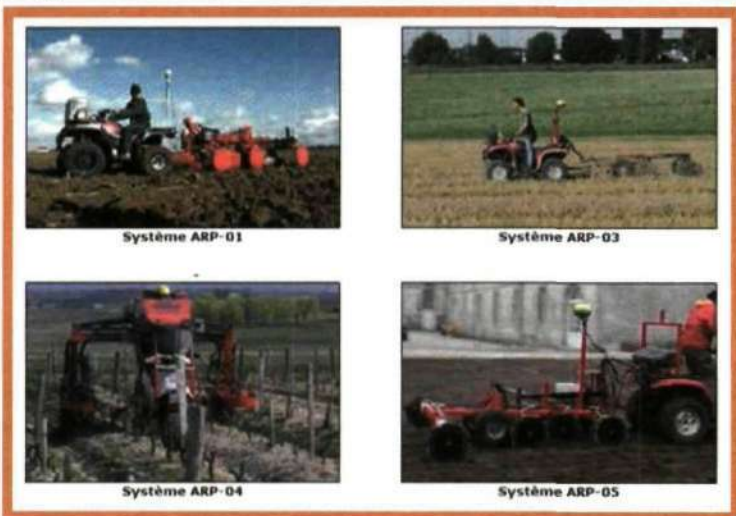


Figura 3.



lo, el pH, la temperatura y la ECe obtenida en extracto 1:1 para muestras de suelo a un máximo de 30 cm de profundidad. Por el contrario, la ECa está negativamente relacionada con el contenido en agua, la materia orgánica y el contenido total de nitrógeno y carbono. El hecho de que la constante dieléctrica del agua sea un orden de magnitud superior a la del suelo, hace que la medida de la ECa sea muy atractiva para

FOTO 1



FOTO 2



determinar el contenido de agua; algunos autores indican que el 84% de la variabilidad de un suelo puede ser debida exclusivamente a ello. La **figura 4** muestra un ejemplo de mapeado de la ECa.

Un aspecto importante en los equipos EM es que tanto la velocidad de operación como la altura de la bobina respecto al suelo o la temperatura ambiente en relación con la electrónica del instrumento pueden generar derivas importantes, por lo que todo ello ha de ser tenido en cuenta y, en su caso, corregido.

Un tercer dispositivo capaz de evaluar la ECa del suelo es el TDR (reflectometría en el dominio del tiempo). Este procedimiento está basado en el tiempo que necesita un pulso de voltaje para recorrer una probeta de suelo hacia abajo y vuelta, evaluando asimismo la atenuación de la señal durante el trayecto. Tiene la ventaja de que permite determinar independientemente el contenido en agua y la Eca, aunque su determinación en tiempo real montado sobre un equipo en marcha no está resuelta todavía.

Sensores mecánicos

El procedimiento normalizado para la determinación de la compactación del suelo es la penetración vertical con cono según el procedimiento ASAE (American Society of Agricultural Engineers, actualmente ASABE). Sin embargo, este procedimiento es discreto (puesto que exige la realización del ensayo con el equipo parado) y lento incluso cuando se emplean equipos automatizados dotados de varios conos simultáneamente (**foto 2**).

Las células de carga y las galgas extensiométricas son dispositivos muy adecuados para determinar los esfuerzos a los que se ven sometidos los aperos de labranza. El procedimiento más sencillo es la colocación de dinamómetros calibrados en el enganche tripuntal (**fotos 3a** y **3b**), aunque en términos generales cualquier apero de labranza convenientemente instrumentado puede ser empleado para realizar un mapeado de la compactación del suelo.

Cuando se desea detectar suelas de labor y verificar la compacta-

ción a distintas profundidades, resulta imprescindible instalar sensores a diversas alturas respecto a la superficie. En 2007, la Universidad de California y el USDA han evaluado sendos dispositivos para la determinación de índice de cono horizontal (**figuras 5a** y **5b**).

La conclusión fundamental es que la velocidad crítica por debajo de la cual ésta no tiene efecto sobre la determinación de la compactación se sitúa entre 0,5 y 1,5 m/s (2,5-4,5 km/h). Además, ambos dispositivos manifiestan una mayor relación entre ellos ($r^2=0,66$) que en relación con el índice de cono vertical ($r^2=0,2$), mostrando ambos mayor nivel de detalle en la variación espacial que éste último. La relación entre los dispositivos USDA y UC-Davis es menor para los primeros 10 cm del suelo, que son las zonas menos compactadas. Por otra parte, la repetibilidad de ambos dispositivos ronda 0,2 MPa (para un rango de variación de 0 a 3 Mpa) (**figura 6**).

Sensores ópticos

Históricamente el color del suelo (reflectancia en la zona visible del espectro electromagnético, 400-700 nm) ha sido uno de los más obvios parámetros empleados en la caracterización de la heterogeneidad del suelo agrícola. Más recientemente se ha incorporado el infrarrojo cercano (NIR, 700-2.400 nm), banda donde los grupos funcionales C-H, N-H, y O-H absorben energía de manera que resulta idónea para cuantificar distintas formas de carbono, nitrógeno y agua, respectivamente.

El método más adecuado para la obtención de información espectrofotométrica del suelo de forma dinámica es la instalación de una ventana de zafiro en la base de una reja (**figura 7**) de manera que el movi-

Figura 4.

mapa EMI, de una cuadrícula de 10 x 24 m

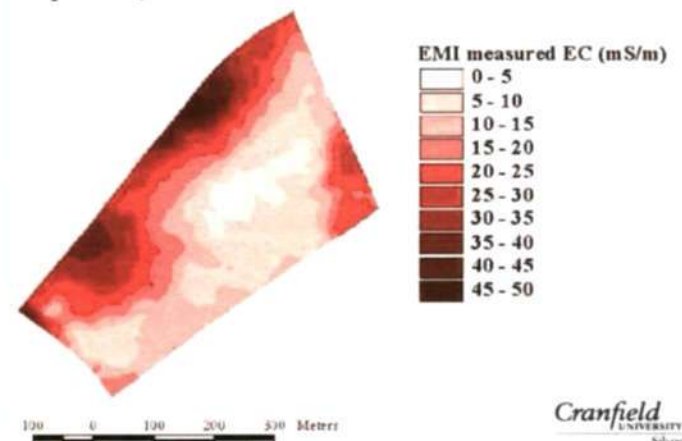
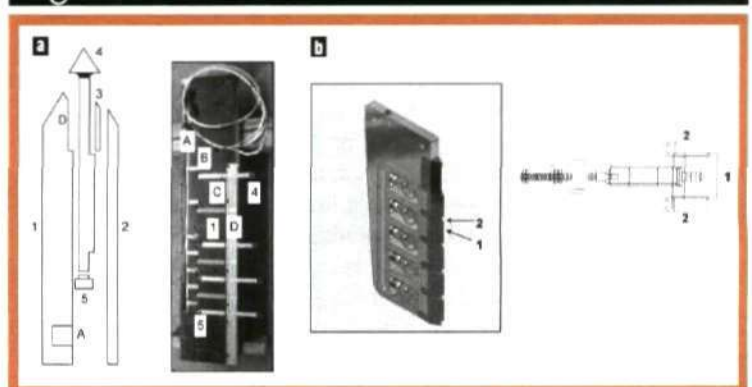


Figura 5.





miento de la herramienta genera un efecto de autolimpieza y la ventana no se ve afectada por polvo en suspensión en el aire. Este tipo de dispositivos exige un proceso frecuente de autocalibración respecto a referencias internas y es capaz de trabajar a un máximo de 6 km/h (50 m/s para obtener un espectro).

Al igual que los sensores eléctricos y electromagnéticos, los ópticos responden frecuentemente a una combinación de atributos del suelo: contenido en agua, materia orgánica, nitrógeno y carbono total. Sin embargo, la respuesta espectral de distintos rangos de longitud de onda está afectada a distinto nivel es por dichos atributos, de manera que es posible según los casos aislar el efecto de cada uno de ellos.

En la aplicación de las propiedades ópticas destaca la evolución hacia rangos de longitud de onda más amplios (empleo de detectores multicanal de silicio junto con otros de indio, galio y arsénico) y técnicas de procesamiento de datos multidimensionales que combinan procesos de

transferencia de calibración para distintas zonas, y de identificación de espectros anómalos. El **cuadro II** resume algunos de los resultados disponibles desde su inicio en los años noventa del siglo XX.

Sensores electro-químicos

Los sensores electro-químicos han sido tradicionalmente empleados en laboratorio para determinar la fertilidad del suelo, tal es el caso de los consabidos electrodos de vidrio para la determinación del pH. El **cuadro III** resume algunos de los electrodos disponibles a nivel comercial para determinar protones, potasio y nitratos.

Cuadro II.

Capacidad predictiva de los métodos ópticos espectrofotométricos para la caracterización del suelo.
Fuente: Christy, 2002.

	1991	1999	2003	2007
	En laboratorio	En campo	En campo	En campo
	660 m	4 longitudes de onda entre 400 y 2.400 nm	Todas longitudes onda entre 900 y 1.7000 nm	Todas longitudes onda entre 900 y 1.700 nm
Materia orgánica	$r^2=0,71$	$r^2=0,87$	-	$r^2=0,80$
pH	-	$r^2=0,61$	$r^2=0,72$	$r^2=0,62$
Eca	-	$r^2=0,64$	-	$r^2=0,68$
Contenido en agua	-	$r^2=0,68$	$r^2=0,82$	$r^2=0,65$
Nitrógeno total	-	-	$r^2=0,86$	-
Carbono total	-	-	$r^2=0,87$	$r^2=0,92$

Figura 6.

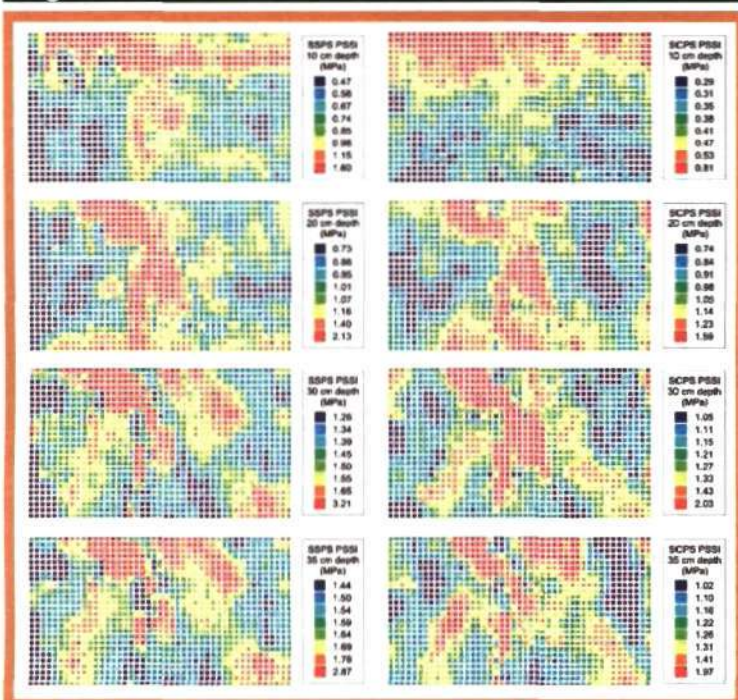


Figura 7.



Figura 8.



La empresa Veris comercializa un dispositivo para la medida directa en suelo (DSM), empleando para ello una matriz de ISEs y un tanque de agua que favorece la humectación del suelo (figura 8); la duración de cada medida se sitúa entre 5 y 15 s.

Desde finales de los noventa del siglo XX, se han incorporado al mercado electrodos ión-específicos encapsulados en PVC, o los más novedosos transistores de efecto de campo (FET) también ión-selectivos (ISFETs). Éstos tienen algunas ventajas sobre el resto, como por

Cuadro III.

ISEs evaluados por Adamchuk y cols. en 2005 para su incorporación a un dispositivo de análisis dinámico del suelo. Los electrodos de pH son actualmente empleados por la compañía Veris en una plataforma móvil para el análisis electro-químico del suelo, b: Nico scientific Inc, c: Erlich Industrial Development (EID) Corp.

ISE	MODELO	TIPO	PRECISIÓN (pX)	EXACTITUD (pX)
pH	p17 ^a	Vidrio	0,12	0,16
pH	EID-E-FPH-DOME ^c	Vidrio	0,12	0,19
pH	EID-E-FPH-A001 ^c	Vidrio	0,11	0,20
pK	DetecIONTM 30318N ^b	PVC	0,13	0,15
pK	EID-E-CIX-AOKT ^c	PVC	0,17	0,17
pNO ₃	DetecIONTM 30218N ^b	PVC	0,19	0,12
pNO ₃	EID-E-FPH-AONO ^c	PVC	0,22	0,17

ejemplo sus reducidas dimensiones, la baja impedancia de salida, la elevada relación señal/ruido y la rapidez de respuesta (2-5 s). Tan sólo los ISFET para pH se encuentran ampliamente disponibles a nivel comercial, aunque se han desarrollado chips multi-ISFET que se encuentran en evaluación a nivel de prototipo.

Para todos los sensores electro-químicos, la unidad empleada en la determinación de la concentración es el pX, es decir, el menos logaritmo de la concentración molar del ión X en agua.

Es importante remarcar que el error de precisión obtenido con los ISEs en laboratorio es siempre inferior al registrado en los equipos de medida directa en campo. Un reciente estudio de 2007 indica que el error de precisión en pH, pK y pNO₃ se multiplica por 2, 15 y 20, respectivamente, cuando comparamos las medidas directas en campo con las de laboratorio.

Conclusiones

Existe una variedad de tecnologías que hoy por hoy puede usarse en dinámico para el mapeado de las características del suelo con velocidades que oscilan entre (2-3 km/h) para los sensores mecánicos y 6 km/h para los ópticos y electromagnéticos. En un futuro pueden ser parte de dispositivos de agricultura de precisión capaces de optimizar el laboreo en tiempo real según las condiciones del suelo.

Los sensores eléctricos y electromagnéticos junto con los ópticos son los más inespecíficos, mientras que los mecánicos y electroquímicos se ciñen a la determinación de la densidad aparente del suelo y de la concentración de iones, respectivamente. Resulta por ello conveniente recomendar el empleo conjunto de técnicas específicas e inespecíficas de manera que la información sea más fácilmente interpretable.

Dada la elevadísima inespecificidad de los sensores eléctricos y electromagnéticos, la principal utilidad a corto plazo puede residir en dirigir el muestreo del suelo optimizando los recursos de laboratorio.

Los usuarios de estas técnicas demandan la elaboración de algoritmos que permitan emplear los resultados de los sensores directamente para el manejo específico del suelo. Parece claro que a corto plazo el énfasis se desplazará hacia la realización de estudios sobre el valor económico de la información aportada por las distintas tecnologías.

Los sensores en campo son necesariamente un complemento de las técnicas de detección remota cuyo mayor interés reside en el seguimiento de propiedades del suelo especialmente dinámicas relacionadas con los ciclos vegetativos de los cultivos, siendo los sensores en campo más fiables para la determinación de características estables como la textura, salinidad y compactación del terreno.

BIBLIOGRAFÍA: Existe una amplia bibliografía a disposición de los lectores que se puede solicitar en la dirección: redaccion@eumedia.es